

УДК 662.76, 662.8

## ГАЗИФИКАЦИЯ УЛЬТРАТОНКИХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

© 2019 г. Е. Г. Горлов<sup>1,\*</sup>, В. Г. Андриенко<sup>2,\*\*</sup>, М. Я. Шпирт<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> ФГУП Институт горючих ископаемых — научно-технический центр по комплексной переработке твердых горючих ископаемых (ФГУП ИГИ), 119071 Москва, Россия

<sup>2</sup> ЗАО “Компомаш — ТЭК”, 127018 Москва, Россия

\*e-mail: gorloveg@mail.ru

\*\*e-mail: 38andrienko@mail.ru

\*\*\*e-mail: Shpirt@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

После доработки 15.05.2019 г.

Принята к публикации 03.06.2019 г.

Разработана технология получения ультратонких водоугольных суспензий для использования их в качестве сырья для прямоточно-вихревой газификации с сухим золоудалением.

Ключевые слова: *бурые и каменные угли, переработка в мелкодисперсные ВУТ, термодинамический расчет газификации, газификация при атмосферном давлении*

DOI: 10.1134/S0023117719060021

### ВВЕДЕНИЕ

В промышленном масштабе в настоящее время применяются методы газификации в плотном (метод Лурги) и кипящем слоях. Эти методы имеют существенные недостатки [1–3].

Рассмотренный опыт промышленного применения слоевой газификации (метод Лурги) угля с жидким шлакоудалением для получения генераторного газа выявляет его основные недостатки:

значительные выходы фракций мелкого угля на стадии дробления, обусловленные требованием использования в газогенераторе только классифицированного крупного угля, что требует поиска путей рациональной утилизации указанных угольных фракций;

малая скорость процесса газификации, обусловленная большими размерами кусков топлива и, как следствие, их низкой удельной поверхностью;

большая вероятность образования “прогаров” в слое, нарушающих нормальное протекание процесса реагирования окислителей с органическими компонентами угля;

образование больших количеств смолы при газификации низкометаморфизованных каменных и бурых углей и отсутствие технических решений по улавливанию смолы из газа газификации, обоснованных технико-экономическими расчетами;

применение для газификации кислорода или воздуха, обогащенного кислородом, повышен-

ные расходы исходного топлива вследствие необходимости проведения процесса при высоких температурах, обеспечивающих жидкое шлакоудаление;

необходимость включения в технологический процесс газификации двух технологий подготовки угля: порошка для вдувания через фурмы в зону горения и кускового топлива с определенным размером кусков.

Указанные недостатки не позволили реализовать на промышленных установках газификацию в стационарном слое с жидким шлакоудалением.

Существенными недостатками отличается и метод газификации в кипящем слое:

как и при газификации по методу Лурги, относительно высокие выходы угля мелких классов (менее 5 мм) на стадии подготовки топлива, поскольку для процесса применяются только определенные фракции угля;

большой вынос непрореагировавшего полностью топлива вместе с зольным уносом, что обуславливает необходимость возврата на газификацию значительных количеств этих продуктов;

значительное осложнение газоочистки вследствие высоких концентраций твердых частиц, содержащих до 40–60% горючих в сыром газе;

большая металлоемкость, поскольку для промышленных установок рекомендуется проводить процесс при давлениях выше 4МПа.

По мнению авторов статьи, наиболее перспективны для крупных промышленных установок

**Таблица 1.** Классификация водоугольных суспензий

| Параметр                                  | Обозначение и единицы измерения | Группа пригодности углей для приготовления ВУС                                            | Характеристика водоугольных суспензий                                                          |
|-------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Максимальная крупность частиц в суспензии | $d_{\max}$ , мм                 | $d_{\max} < 0.01$<br>$0.010 < d_{\max} < 0.5$<br>$0.5 < d_{\max} < 13$<br>$13 < d_{\max}$ | Ультратонкие<br>Тонкодисперсные<br>Грубодисперсные<br>Угольные пульпы                          |
| Массовая доля твердой фазы в суспензии    | $C_T$ , %                       | $0 < C_T < 45$<br>$45 < C_T < 55$<br>$55 < C_T < 75$<br>$75 < C_T$                        | Низкоконцентрированные<br>Среднеконцентрированные<br>Высококонцентрированные<br>Угольные пасты |
| Зольность угля в суспензии                | $A^d$ , %                       | $A^d < 1$<br>$1 < A^d < 8$<br>$8 < A^d < 20$<br>$20 < A^d < 70$<br>$70 < A^d$             | Ультрачистые<br>Малозольные<br>Среднезольные<br>Высокозольные<br>Отходы                        |

методы газификации пылевидного топлива, подаваемого либо непосредственно в смеси с окислителем, либо в виде водоугольных суспензий.

В эксплуатируемых за рубежом промышленных установках газификации используются преимущественно процессы газификации в потоке (Тексако, Доу, Шелл).

Можно утверждать, что именно процесс Тексако получит наибольшее распространение для работы как в составе КППЦ, будучи реализованным в 9 из 14 действующих в мире промышленных электростанциях на угле или тяжелых нефтяных остатках, так и при производстве синтез-газа для химической промышленности. Основное отличие этого процесса от традиционных процессов газификации углей — это использование водоугольной суспензии со средним размером частиц угля 60 мкм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Водоугольные суспензии (в том числе с использованием реагентов-пластификаторов) — одна из оптимальных форм нового вида угольного топлива, характеризуются следующими основными параметрами и технологическими признаками: гранулометрическим составом, в том числе максимальной крупностью угольных частиц в суспензии; массовой долей твердой фазы; зольностью угля и суспензии; реологическими характеристиками; наличием или отсутствием реагентов-пластификаторов; способностью сохранять

свои свойства длительное время при хранении и транспортировании.

В результате проведенных комплексных исследований углей и экспериментальных работ по производству и использованию водоугольных суспензий в ИГИ совместно с НПО “Гидротрубопровод” разработана классификация водоугольных суспензий (табл. 1) и установлено, что из гумусовых углей наиболее пригодны к крупномасштабному производству водоугольных суспензий каменные угли марок Д, Г, Т, ОС, С С и антрациты [4].

Высококонцентрированные водоугольные суспензии — это готовое водоугольное топливо, максимальная крупность частиц твердой фазы в котором соответствует требуемой при пылевидном сжигании угля (как правило, 200–500 мкм). Для эффективной газификации крупность должна быть значительно меньше (не более 10 мкм), чтобы обеспечить максимальное выгорание топлива при малом времени пребывания в активной зоне горения.

Вода в суспензии является инертным материалом, снижающим теплотворную способность топлива, поэтому в процессе приготовления необходимо добиваться максимального значения массовой доли твердой фазы, обеспечивая при этом необходимые текучие свойства. Эффективные способы достижения указанной цели — это управление гранулометрическим распределением частиц твердой фазы и применение реагентов-пластификаторов. Так, при бимодальном грану-

лометрическом распределении степень насыщения единицы объема суспензии дисперсной фазой значительно выше по сравнению с обычным гранулометрическим распределением.

Одной из важнейших характеристик водоугольной суспензии является ее зольность, которая определяется содержанием минеральных компонентов в твердой фазе – угле. Повышение зольности угля в водоугольной суспензии, так же как и влажности, приводит к снижению энергетической ценности топлива.

Большая эффективность использования и экологическая чистота водоугольного топлива обеспечиваются применением ультрачистых *i* малозольных суспензий. Минеральная часть углей оказывает существенное влияние на диспергируемость, поверхностные свойства измельченных частиц, стабильность и структурно-реологические характеристики ВУС.

В настоящее время для практического использования получили распространение грубодисперсные, среднеконцентрированные, малозольные и среднезольные тонкодисперсные высококонцентрированные суспензии. Последние представляют собой композиционное водоугольное топливо, готовое к использованию без предварительной подготовки. Высокозольные суспензии готовят из угольных шламов и тонкодисперсных отходов обогащения угля и применяют, как правило, для утилизации последних.

Для водоугольного топлива важнейшими характеристиками, определяющими его свойства как жидкого топлива, являются реологические параметры и показатели стабильности. Реологические свойства водоугольных суспензий определяются главным образом свойствами дисперсной твердой фазы (химическим составом и количеством минеральной части угля, массовой долей твердой фазы и гранулометрическим составом частиц и др.), дисперсионной среды и типом применяемой пластифицирующей добавки.

В ИГИ совместно с ЗАО “Компомаш – ТЭК” разработана технология получения ультратонких водоугольных суспензий для использования их в качестве сырья для прямоточно-вихревой газификации с сухим золоудалением [6–9].

Одна из особенностей этой технологии состоит в том, что для приготовления достаточно стабильной ВУС с концентрацией твердой фазы ≥50% из бурого угля последний должен “бертинироваться”, т.е. приобрести некоторые свойства каменного угля, что достигается его сушкой в вихревой камере по технологии ИГИ до рабочей влажности ≤5 мас. % с одновременным выделением части “летучих” веществ (СО, СО<sub>2</sub> и др.), образующихся из органических веществ угля при его сушке с конечной температурой частиц около 120°С.

**Таблица 2.** Характеристики состава исходных углей, мас. %

| $W_i^r$                                      | $A^d$ | $S_i^d$ | $C^{daf}$ | $H^{daf}$ | $N^{daf}$ | $O^{daf}$ |
|----------------------------------------------|-------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Разрез Березовский, Б2Р                      |       |         |           |           |           |           |
| 33.0                                         | 7.0   | 0.3     | 71.0      | 4.9       | 0.7       | 23.0      |
| Кузнецкий бассейн, марка Д, разрез Моховский |       |         |           |           |           |           |
| 10.0                                         | 16.0  | 0.5     | 77.5      | 5.4       | 2.2       | 4.3       |

На стадию механоактивации с размолом частиц до ≤5 мкм поступает либо каменный уголь крупностью (0–5 мм) из молотковой дробилки, либо бурый уголь из вихревой камеры. Были выполнены термодинамические расчеты состава продуктов газификации водоугольных суспензий (ВУС) бурого и каменного углей [5].

В табл. 2 приведены характеристики исследованных углей для термодинамических расчетов. Расчеты состава продуктов газификации проводили на примере водоугольной суспензии углей, содержащей 40% воды. Необходимое количество дутья (воздуха) для газификации рассчитывали следующим образом:



где  $C_k H_l O_m N_n S_\xi$  – символическая формула угля;  $k, l, m, n, \xi$  – числа молей соответствующих компонентов в 1 кг угля в рабочем состоянии.

Для кислорода получим следующее равенство молей в правой и левой частях:

$$m + 2v_{сж} = 2k + l/2 + 2\xi,$$

$$v_{сж} = (2k + l/2 + 2\xi - m)/2,$$

$$v_{сж} = k + l/4 + \xi - m/2.$$

Переходя к стандартным обозначениям состава углей, получим

$$v_{сж} = C_{угля} : 12.01 + H_{угля} : 4.03 + S_{угля} : 32.06 - O_{угля} : 32.$$

Для угля разреза Березовский (Б)  $v_{сж} = 40.06$ ; разреза Моховский (Д)  $v_{сж} = 55.83$ . Расчеты были проведены для нескольких вариантов: 1 – при условии, что вся вода, содержащаяся в суспензии, реагирует с углеродом угля; 2 – 40% воды вступает в реакцию с углеродом; 3 – при различных коэффициентах избытка окислителя ( $\alpha$ ):  $\alpha = 0.3$ ;  $\alpha = 0.4$  и  $\alpha = 0.5$ . Расчеты при  $\alpha = 0.3$  и  $\alpha = 0.5$  проводили только для угля разреза Березовский. Если  $\alpha = 0.3$ , то необходимое количество окислителя для угля разреза Березовский  $40.06 \times 0.3 \times$

**Таблица 3.** Равновесный состав продуктов газификации ВУС угля разреза Березовский в зависимости от температуры ( $\alpha = 0.4$ )

| Компонент        | Температура, К     |      |      |      |                    |      |      |      |
|------------------|--------------------|------|------|------|--------------------|------|------|------|
|                  | 1000               | 1100 | 1200 | 1300 | 1000               | 1100 | 1200 | 1300 |
|                  | Реагирует вся вода |      |      |      | Реагирует 40% воды |      |      |      |
| H <sub>2</sub>   | 20.0               | 18.6 | 17.6 | 16.7 | 17.2               | 16.1 | 15.2 | 14.4 |
| CO               | 8.4                | 9.8  | 11.0 | 11.8 | 11.2               | 12.4 | 13.3 | 14.1 |
| CO <sub>2</sub>  | 13.5               | 12.1 | 11.1 | 10.2 | 10.8               | 9.6  | 8.6  | 8.0  |
| H <sub>2</sub> O | 22.1               | 23.4 | 24.3 | 25.3 | 11.6               | 12.7 | 13.6 | 14.4 |
| N <sub>2</sub>   | 36.0               | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.0               | 36.0 | 36.0 | 36.0 |

**Таблица 4.** Равновесный состав продуктов газификации ВУС угля разреза Березовский в зависимости от температуры ( $\alpha = 0.5$ )

| Компонент        | Температура, К     |      |      |      |                    |      |      |      |
|------------------|--------------------|------|------|------|--------------------|------|------|------|
|                  | 1000               | 1100 | 1200 | 1300 | 1000               | 1100 | 1200 | 1300 |
|                  | Реагирует вся вода |      |      |      | Реагирует 40% воды |      |      |      |
| H <sub>2</sub>   | 15.4               | 14.3 | 13.3 | 12.5 | 13.3               | 12.3 | 11.4 | 10.7 |
| CO               | 6.4                | 7.5  | 8.4  | 9.2  | 8.4                | 9.4  | 10.3 | 11.1 |
| CO <sub>2</sub>  | 13.8               | 12.6 | 11.7 | 10.9 | 11.8               | 10.7 | 9.8  | 9.1  |
| H <sub>2</sub> O | 23.2               | 24.3 | 25.3 | 26.1 | 13.1               | 14.1 | 15.0 | 15.7 |
| N <sub>2</sub>   | 41.2               | 41.2 | 41.2 | 41.2 | 41.2               | 41.2 | 41.2 | 41.2 |

**Таблица 5.** Равновесный состав продуктов газификации ВУС угля разреза Березовский при условии, что 40% воды суспензии взаимодействует с углеродом ( $\alpha = 0.3$ )

| Компонент        | Температура, К |      |      |      |
|------------------|----------------|------|------|------|
|                  | 1000           | 1100 | 1200 | 1300 |
| H <sub>2</sub>   | 21.7           | 20.7 | 19.8 | 19.0 |
| CO               | 14.6           | 15.8 | 16.8 | 17.6 |
| CO <sub>2</sub>  | 9.5            | 8.3  | 7.3  | 6.6  |
| H <sub>2</sub> O | 9.8            | 11.0 | 12.0 | 12.6 |
| N <sub>2</sub>   | 29.6           | 29.6 | 29.6 | 29.6 |

$\times 32 = 0.38$  кг O<sub>2</sub>, соответственно для  $\alpha = 0.4 - 0.51$  кг O<sub>2</sub> и для  $\alpha = 0.5 - 0.64$  кг O<sub>2</sub>. Для угля разреза Моховский необходимое количество окислителя при  $\alpha = 0.4 - 0.71$  кг O<sub>2</sub>. Результаты расчетов представлены в табл. 3–5 (данные по составу газа – об. %, температура – К). На примере угля разреза Березовский было исследовано влияние давления на состав газа, получаемого газификацией водоугольной суспензии этого угля. Расчеты были выполнены для  $\alpha = 0.4$  и давления 0.5 и 1 МПа (табл. 6).

Согласно результатам расчетов, давление не оказывает существенного влияния на состав газов, получаемых газификацией ВУС угля.

Учитывая приведенные результаты по газификации ВУС угля разреза Березовский, аналогичные расчеты состава газа, получаемого газифика-

**Таблица 6.** Влияние давления на равновесный состав продуктов газификации ВУС угля разреза Березовский при  $\alpha = 0.4$  (реагирует 40% от общего содержания  $H_2O$ )

| Компонент        | Температура, К     |      |      |      |                  |      |      |      |
|------------------|--------------------|------|------|------|------------------|------|------|------|
|                  | 1000               | 1100 | 1200 | 1300 | 1000             | 1100 | 1200 | 1300 |
|                  | Давление = 0.5 МПа |      |      |      | Давление = 1 МПа |      |      |      |
| $H_2$            | 16.4               | 16.0 | 15.2 | 14.4 | 15.0             | 15.8 | 15.2 | 14.4 |
| CO               | 10.6               | 12.3 | 13.3 | 14.1 | 9.6              | 12.2 | 13.3 | 14.1 |
| CO <sub>2</sub>  | 11.1               | 9.6  | 8.6  | 8.2  | 11.6             | 9.7  | 8.6  | 7.9  |
| H <sub>2</sub> O | 12.0               | 12.7 | 13.6 | 14.4 | 12.6             | 12.8 | 13.6 | 14.4 |
| N <sub>2</sub>   | 36.2               | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 36.8             | 36.0 | 36.0 | 36.0 |

**Таблица 7.** Влияние температуры на процесс газификации ВУС (50%-ная концентрация в ВУС, средний размер частиц угля 1.5 мкм, воздушное дутье, коэффициент избытка кислорода 0.4, давление 0.5 МПа)

| Температура, °С | Состав газа из термоугля, об. %         |      |                |                | Теплота сгорания, ккал/м <sup>3</sup> |
|-----------------|-----------------------------------------|------|----------------|----------------|---------------------------------------|
|                 | CO <sub>2</sub>                         | CO   | H <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |                                       |
| 850             | 3.3                                     | 17.5 | 16.9           | 62.0           | 964                                   |
| 900             | 3.4                                     | 18.8 | 16.2           | 61.3           | 986                                   |
| 1000            | 3.4                                     | 20.2 | 15.8           | 60.1           | 1017                                  |
| 1100            | 3.7                                     | 21.1 | 15.2           | 59.7           | 1029                                  |
| Температура, °С | Состав газа каменного угля марки, об. % |      |                |                | Теплота сгорания, ккал/м <sup>3</sup> |
|                 | CO <sub>2</sub>                         | CO   | H <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |                                       |
| 850             | 4.4                                     | 16.9 | 16.3           | 62.2           | 930                                   |
| 900             | 4.6                                     | 18.5 | 16.1           | 60.4           | 974                                   |
| 1000            | 4.8                                     | 20.0 | 15.6           | 59.4           | 1006                                  |
| 1100            | 5.4                                     | 20.8 | 14.9           | 58.2           | 1012                                  |

цией ВУС угля разреза Моховский, проводили для  $\alpha = 0.4$  при условии, что только 40% от общего содержания воды реагирует с углеродом.

Для подтверждения термодинамических расчетов были проведены эксперименты на лабораторной проточной установке производительностью 4 кг/ч по ВУС. В качестве исходных углей для приготовления ВУС были взяты бурый уголь Бородинского месторождения и каменный уголь

марки Д Беловского месторождения. Некоторые результаты экспериментов приведены в табл. 7, 8.

Проведенные исследования позволили выбрать оптимальные режимы прямоточно-вихревой газификации (коэффициент избытка воздуха 0.4; температура 950–1100°С). В табл. 9 приведены сравнительные показатели известных процессов газификации углей и вновь разрабатываемые

**Таблица 8.** Влияние концентрации кислорода на процесс газификации ВУС (50%-ная концентрация термоугля Бородинского месторождения в ВУС, средний размер частиц угля 1.5 мкм, коэффициент избытка кислорода 0.4, температура газификации 1000°C, время контакта 1.5 с, давление 0.5 МПа)

| Концентрация кислорода в дутье, об. % | Состав газа, об. % |      |                |                | Теплота сгорания, ккал/м <sup>3</sup> |
|---------------------------------------|--------------------|------|----------------|----------------|---------------------------------------|
|                                       | CO <sub>2</sub>    | CO   | H <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |                                       |
| 21                                    | 3.4                | 20.2 | 15.8           | 60.1           | 1017                                  |
| 50                                    | 6.5                | 35.8 | 33.0           | 23.0           | 1931                                  |
| 95                                    | 12.1               | 43.5 | 41.4           | 1.6            | 2380                                  |

**Таблица 9.** Сравнительные показатели процессов газификации углей

| Характеристика процесса | Вихревой поток – <i>Uhde, Shell</i>                                  | Подвижный слой – <i>BGL</i>                                         | Подвижный слой – <i>Sasol, Lurgi</i>                                       | PWR – прямоточная пылеугольная                                       | Прямоточно-вихревая                                                       |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Процесс                 | Промышленный процесс                                                 | Промышленный процесс                                                | Промышленный процесс                                                       | Опытно-промышленная установка                                        | Опытно-промышленная установка                                             |
| Гибкость процесса       | Любой уголь (крупность < 0.1 мм, зольность до 60%, влажность до 30%) | Любой уголь (крупность 6–50 мм, зольность до 30%, влажность до 30%) | Неспекающиеся угли (крупность 6–50 мм, зольность до 23%, влажность до 15%) | Любой уголь (крупность < 0.1 мм, зольность до 60%, влажность до 20%) | Любой уголь (крупность до 10 мкм, зольность до 25%, влажность ВУС до 50%) |
| Эффективность процесса  | Степень конверсии 99%, H <sub>2</sub> /CO = 0.4–0.5                  | Степень конверсии 99%, H <sub>2</sub> /CO = 0.4–0.5                 | Степень конверсии 92%, H <sub>2</sub> /CO = 1.7–2.3                        | Степень конверсии 99%, H <sub>2</sub> /CO = 1.7–2.3                  | Степень конверсии 99%, H <sub>2</sub> /CO = 1.8–2.3                       |

в США (*PWR*) и РФ (прямоточно-вихревая) мелкодисперсных углей.

Переработка ультратонкой ВУС в прямоточно-вихревом газификаторе позволяет получить генераторный газ, который после очистки от пыли, H<sub>2</sub>S и CO<sub>2</sub>, содержит в среднем (об. %): для бурого угля CO<sub>2</sub> 0.1; CO 12.6; H<sub>2</sub> 19.2; H<sub>2</sub>O 25.7; N<sub>2</sub> 37.2; CH<sub>4</sub> 4.2; для каменного угля CO<sub>2</sub> 0.8; CO 2.1; H<sub>2</sub> 15.6; H<sub>2</sub>O 11.9; N<sub>2</sub> 47.5; CH<sub>4</sub> 3.2. Теплота сгорания очищенного генераторного газа составляет 1150 ккал/нм<sup>3</sup> (4.82 МДж/нм<sup>3</sup>) и 1220 ккал/нм<sup>3</sup> (5.11 МДж/нм<sup>3</sup>) для бурого и каменного угля (Д) соответственно. Выходы этих газов составляют 3500 и 4050 нм<sup>3</sup> на 1 т бурого и каменного угля соответственно.

Выходы этих газов составляют 3500 и 4050 нм<sup>3</sup> на 1 т бурого и каменного угля соответственно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремин И.В., Броновец Т.М. Марочный состав углей и их рациональное использование. М.: Недра, 1994. 254 с.
2. Самуйлов Е.В., Корценштейн Н.М., Лебедева Л.Н. // ХТТ. 2003. № 1. С. 42.
3. Шиллинг Г.-Д., Бонн Б., Крауз У. Газификация угля. Перевод с нем. Под ред. Исламова С.Р. М.: Недра, 1986. 175 с.
4. Сеченов Г.П., Альтшулер В.С. // Теория и технология переработки топлив. М.: Недра, 1966. С. 82.
5. Зайденварг В.Е., Трубецкой К.Н., Мурко В.И., Нехороший И.Х. Производство и использование водоугольного топлива. М.: Изд-во Акад. горн. наук, 2001. 173 с.
6. Горлов Е.Г., Быковский В.Б., Вартанова А.А. и др. // ХТТ. 1998. №2. С. 64.
7. Комплексная переработка углей и повышение эффективности их использования. Каталог-справочник. М: НТК “Трек”, 2007. 292 с.
8. Трубецкой К.Н., Моисеев В.А., Дегтярев В.В., Мурко В.И. // Уголь. 2004. № 9. С. 41.
9. Дрожжин В.С., Шпирт М.Я., Данилин Л.Д. и др. // ХТТ. 2008. № 2. С. 53 [Soil Fuel Chem. (2008) 42: 107. <https://doi.org/10.3103/S0361521908020110>]